

○中央大学 学員 太田 真二 中央大学 学員 丸岡 晃
中央大学 正員 平野 廣和 中央大学 正員 川原 睦人

1 はじめに

耐風設計を行う場合、対象となる地点での風環境を推定することはきわめて重要な項目の一つである。従来は地形模型を用いた風洞試験によりこの推定がなされてきた。一方、近年の数値流体解析技術の進歩により、数値解析^[1]の面からもこの推定を行う試みがなされている。以上の背景から、本研究では複雑な地形にも対応可能な有限要素法による $k-\varepsilon$ モデル乱流解析手法を用いて、このような対象地点での複雑な流れ場を解析することを目的とする。

2 基礎方程式

乱流場での運動の基礎方程式として、運動方程式と連続式は次のように表される。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} + \frac{1}{\rho} p_{,i} - \nu_e (u_{i,j} + u_{j,i})_{,j} = 0 \quad (1)$$

$$u_{i,i} = 0 \quad (2)$$

ここに u_i は流速、 p は圧力、 ρ は密度を示す。また、 ν_e は

$$\nu_e = \nu + \nu_t \quad (3)$$

であり、 ν は粘性係数、 ν_t は乱流粘性係数である。また、乱流粘性係数 ν_t 、 k 方程式、 ε 方程式は、

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i k_{,i} = \nu_k k_{,ii} + P - \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \varepsilon_{,i} = \nu_\varepsilon \varepsilon_{,ii} + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \quad (6)$$

と表される。 ν_k と ν_ε は

$$\nu_k = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \quad \nu_\varepsilon = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \quad (7)$$

で表され、 C_μ 、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 σ_k 、 σ_ε は経験定数である。また、乱流エネルギーの生成項である P は次式のように与えられる。

$$P = \nu_e (u_{i,j} + v_{j,i}) u_{i,j} \quad (8)$$

3 解析手法

式(1),(2)に分離型法の一つである流速修正法を適用する。はじめに式(1)から圧力を除き中間流速として $\tilde{u}_i$ を式(9)のように定義する。また、式(1)から式(9)を引けば式(10)が得られる。式(10)の発散を取り、式(2)の非圧縮条件を課すと圧力ポアソン方程式(11)が得られる。

$$\frac{\tilde{u}_i - u_i^n}{\Delta t} + u_j^n u_{i,j}^n - \nu_e (u_{i,j}^n + u_{j,i}^n)_{,j} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{u_i^{n+1} - \tilde{u}_i}{\Delta t} + \frac{1}{\rho} p_{,i}^{n+1} = 0 \quad (10)$$

$$p_{,ii}^{n+1} = \frac{\rho}{\Delta t} \tilde{u}_{i,i} \quad (11)$$

この解法は、一度中間流速 $\tilde{u}_i$ を求め、 $\tilde{u}_i$ を圧力 p^{n+1} によって修正することから流速修正法と呼ばれている。

以上から、式(9),(10),(11)に重みつき残差法を適用し、ガラーキン法の手順で定式化を行えば必要な有限要素方程式が得られる。

4 数値解析例

数値解析モデルとして、図1に示すような段差まわりの流れの解析を行う。形状として、 $L/H = 0.0, 1.0, 2.0, 4.0$ の4つのモデルを行い、 $L/H = 1.0$ の時の2次元の解析メッシュを図2に示す。解析条件はBowenの風洞実験結果^[2]と同一とし、実験値との比較検討を行う。流入条件として $u = u_0(z/z_0)^{1/6}$ を与え、流出で $p = 0.0$ 、その他はFree Slipとしている。壁の条件としては壁法則を用いた。

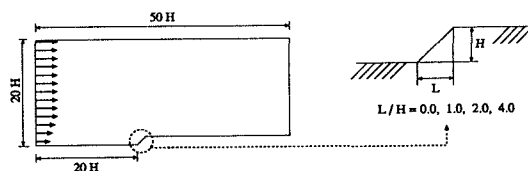


図1 モデル形状

5 解析結果

図3に $L/H = 1.0, 2.0$ の場合の2次元段差まわりの流速ベクトルを示す。これらを見ると段差の角から剥離せずに地表面に沿って流れていることが分かる。これは、流入する乱流エネルギーが大きく、角部で乱流粘性が大きくなっているためと考えられる。また、図4に増速率 η_0

の実験値と解析値との比較を示す。ここでの増速率とは地表面からの同一高さにおける流入速度に対する割合である。これらより、実験値と解析値とがほぼ同様な傾向を示していることが分かる。しかし、上流域などで見られる両者の差は流入境界からの距離が充分でないことや、メッシュの粗さなどが原因として考えられる。

参考文献

- [1] 串岡清則, 斉藤通, 本田明弘: "複雑地形まわり流れへの流動解析の適用", 第13回風工学シンポジウム論文集, 1994.
- [2] Bowen, A.J., Lindley, D.: "A Wind-tunnel Investigation of the wind speed and turbulence characteristics close to the ground over various escarpment shapes", Boundary-Layer Meteorology, Vol.12, pp.259-271, 1977.

6 おわりに

風洞実験結果と解析結果との比較により、増速率はほぼ同様な傾向を示すことが分かった。また、本 $k-\varepsilon$ モデルの実用問題への有効性を確かめることができた。今後は、さらに複雑な地形への適用を行う予定である。

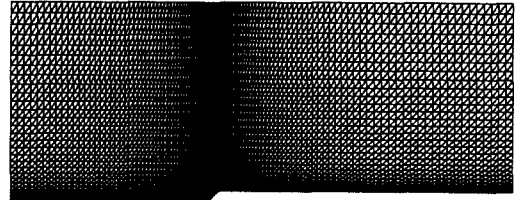
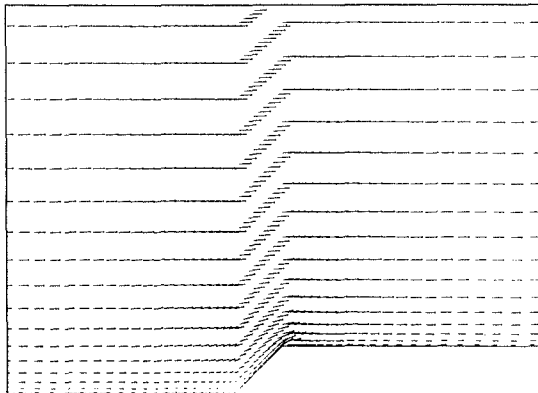
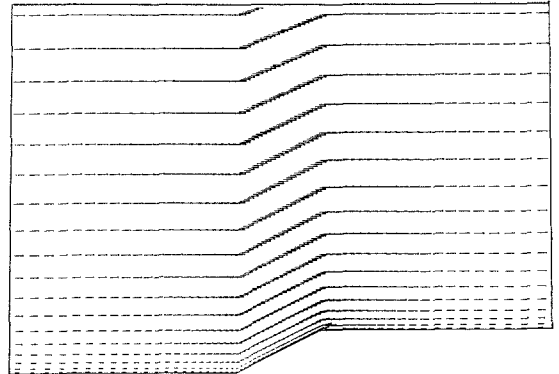


図2 解析メッシュ ($L/H=1.0$)

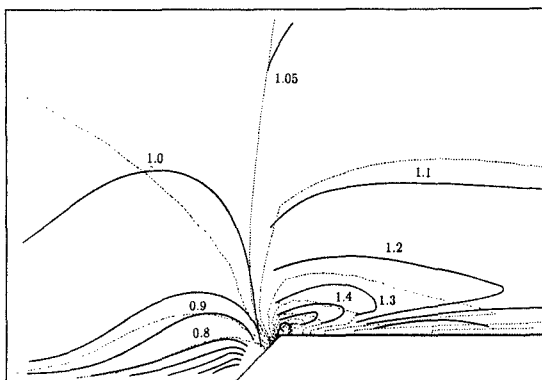


($L/H=1.0$)

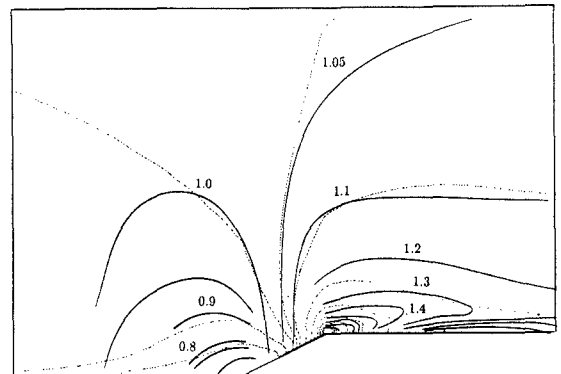


($L/H=2.0$)

図3 段差まわりの流速ベクトル



($L/H=1.0$)



($L/H=2.0$)

——— 実験値
----- 解析値

図4 増速率 η_0 の実験値との比較 ($\eta_0 = u/U_0$ U_0 :同一高さの流入速)